

A1

**DEMANDE
DE BREVET D'INVENTION**

(21)

N° 76 21578

(54) Procédé de brassage électromagnétique de métaux en fusion lors des opérations de coulée continue.

(51) Classification internationale (Int. Cl.²). B 22 D 11/10.

(22) Date de dépôt 13 juillet 1976, à 11 h.

(33) (32) (31) Priorité revendiquée :

(41) Date de la mise à la disposition du public de la demande B.O.P.I. — «Listes» n. 6 du 10-2-1978.

(71) Déposant : INSTITUT DE RECHERCHES DE LA SIDERURGIE FRANÇAISE (IRSID)
(Etablissement professionnel régi par la loi du 17 novembre 1943),
185, rue Président-Roosevelt, 78104 Saint-Germain-en-Laye.

(72) Invention de : Roger Ventavoli et Jean-Pierre Birat.

(73) Titulaire : *Idem* (71)

(74) Mandataire :

La présente invention se rapporte à un procédé de brassage électromagnétique, à champ glissant, en lingotière de coulée continue des métaux en fusion et notamment de l'acier.

Généralement, lors de la coulée en continu de l'acier, les inclusions non
5 métalliques inévitablement présentes dans le bain liquide, et en particulier les plus grosses qui sont les plus gênantes, ont tendance à se concentrer immédiatement sous la surface des produits. Pour des raisons évidentes de qualité de surface des produits laminés en particulier quand ceux-ci sont destinés à la production de tôles pour emboutissage profond, on est alors conduit à flam-
10 mer au préalable les premiers millimètres de peau des produits bruts de coulée. Pour les produits de large section, comme les brames, un tel flammage conduit couramment à une perte d'acier voisine de 4 % en poids, et à des dépenses non négligeables en oxygène et en main d'oeuvre.

On sait actuellement que la quantité et la répartition des inclusions sont
15 conditionnées par la nature de l'écoulement du métal liquide dans la lingotière et on a pu montrer qu'il était possible d'éviter le flammage au moyen d'une bonne maîtrise des mouvements de convection qui se développent dans l'acier liquide au sein de la lingotière.

A cet effet, il est connu, et les travaux du demandeur y ont fortement
20 contribué (demandes de brevets français n° 72/20544, 73/37514, 75/28439, 75/28702, 76/15178,) de pouvoir créer dans le bain métallique des mouvements de convection lavant efficacement le front de solidification au moyen d'un champ magnétique non stationnaire, glissant le long des parois de la lingotière, et de préférence de bas en haut de manière à favoriser de surcroît une décanta-
25 tion rapide des inclusions à la surface libre du métal.

Généralement, le champ magnétique est créé par un inducteur polyphasé, similaire à un stator de moteur linéaire, de structure tubulaire et entourant le produit coulé au niveau de la lingotière. Les résultats obtenus sont positifs en ce sens qu'ils montrent effectivement un transfert des amas d'inclusions sous-
30 cutanées vers le centre des produits. Toutefois il s'agit là d'une technique relativement récente qui n'a pas atteint jusqu'ici toute sa maturité et qui pose encore un certain nombre de problèmes, en particulier sur le plan électromagnétique : l'une des difficultés majeures rencontrées consiste à savoir doser judicieusement l'action de l'inducteur de manière à obtenir rapidement et de
35 façon fiable un résultat industriel désiré, sans expérimentation inutilement longue et coûteuse.

La présente invention a précisément pour but de fournir le moyen de surmonter facilement une telle difficulté.

A cet effet, l'invention a pour objet un procédé de brassage électromagnétique de métaux en fusion, au sein d'une lingotière de coulée continue, à
40

l'aide d'un champ magnétique non stationnaire, glissant le long des parois de la lingotière, caractérisé en ce que la propagation dudit champ magnétique s'effectue selon le sens ascensionnel depuis la partie inférieure de la lingotière jusqu'au moins au niveau de la surface libre du métal coulé et en ce que l'on règle l'action du champ magnétique en fonction du déplacement désiré d des amas d'inclusions non métalliques depuis la surface vers le centre des produits coulés, de manière que la densité de force volumique F, agissant dans le bain métallique satisfasse à la relation :

$$F = 35d^2 + 260d$$

10 où F est exprimée en Newton/m³ et d en mm.

Selon une définition équivalente de la présente invention, on règle la valeur efficace B_{eff} du champ magnétique conformément à la relation :

$$B_{\text{eff}} = \left(\frac{1}{\gamma v} (35 d^2 + 260d) \right)^{1/2}$$

15 où B_{eff} est exprimée en Tesla, d représente le transfert des amas d'inclusions depuis la surface des produits jusqu'à une profondeur désirée, exprimée en mm, γ représente la conductibilité électrique du bain métallique, exprimée en ohm⁻¹. m⁻¹, v représente la vitesse de propagation du champ magnétique glissant, exprimée en m/s.

Comme on le comprend, la présente invention vise à améliorer la propreté inclusionnaire des produits coulés en continu. A cet effet, elle fournit à l'opérateur de coulée un moyen pour régler l'action de l'inducteur de manière que la forte concentration d'inclusions qui, en l'absence de brassage électromagnétique se localise immédiatement sous la surface des produits, soit transférée vers l'axe de ces derniers sur une profondeur de valeur désirée et prédéterminée.

25 Bien entendu, ce transfert ne peut excéder la profondeur correspondant à l'épaisseur de croûte solidifiée au niveau de la sortie de l'entrefer de l'inducteur, et qui est propre au dimensionnement de l'appareillage utilisé. Au delà, en effet, l'inducteur n'a pratiquement plus aucune action de contrôle des mouvements de convection au sein du bain métallique.

30 Les essais industriels effectués par le demandeur ont montré d'une part que le brassage électromagnétique ascensionnel, c'est-à-dire remontant le long des parois de la lingotière, jusque dans la zone supérieure de cette dernière à un niveau correspondant au moins à celui de la surface libre du métal coulé, occasionnait non seulement une diminution de la quantité totale d'inclusions, mais également et surtout un déplacement de la zone à forte teneur en inclusions depuis la surface vers le centre du produit coulé, et d'autre part que ce déplacement augmentait avec la puissance d'action de l'inducteur.

L'explication avancée par le demandeur est la suivante :
40 le métal en fusion introduit par le jet de coulée pénètre à l'intérieur du

métal liquide contenu dans la lingotière avec une certaine quantité de mouvement et provoque de ce fait la formation d'un courant axial descendant au sein du métal. D'autre part le champ magnétique glissant vert le haut confère au métal liquide dans la zone périphérique (en coulant avec le front de solidification)
5 un mouvement ascendant de sens opposé à celui de l'introduction du métal.

Par action combinée de ces deux phénomènes, il s'établit ainsi dans la lingotière un courant circulatoire permanent, le métal liquide remontant à la périphérie et descendant au centre. Les inclusions se trouvent ainsi ramenées vers la surface libre du métal coulé où une partie décante naturellement et
10 l'autre partie est réentraînée axialement au sein de la masse liquide jusqu'à une profondeur, en aval de l'inducteur, où les effets électromagnétiques n'étant plus sensibles, elles sont piégées par le front de solidification.

Le demandeur a poursuivi ses recherches en vue de confirmer l'existence d'une relation, puissance d'action de l'inducteur transfert des inclusions vers
15 le centre des produits coulés, et a réussi à la représenter par une expression analytique, facilement exploitable, de la forme:

$$F = 35d^2 + 260d$$

où F, exprimée en N/m^3 , représente la densité de force volumique devant être créée dans le bain métallique par l'inducteur électromagnétique pour repousser
20 les amas d'inclusions à l'intérieur du produit coulé sur une distance d exprimée en mm et comptée depuis la surface de ce produit.

En fait, la présence de la densité de force volumique F dans cette relation peut présenter certains inconvénients en ce sens qu'elle n'a pas une réalité physique concrète, directement accessible par l'expérimentation. Pour la déterminer il est en effet nécessaire de la calculer, à partir de mesures effectuées
25 sur d'autres paramètres électriques ou magnétiques de l'inducteur. Il en résulte qu'en pratique, l'opérateur de coulée peut moduler l'action de l'inducteur en agissant directement, non pas sur la densité de force volumique F, mais sur d'autres paramètres dont le plus facilement réglable est sans doute le champ
30 magnétique car il suffit pour cela de modifier simplement l'intensité du courant électrique dans l'inducteur.

Il est connu, dans le domaine technique considéré, que la densité volumique de force F (ou plus simplement la force électromagnétique) peut être déterminée selon l'expression

$$35 \quad F = \gamma v B_{eff}^2$$

où γ représente la conductibilité électrique du bain métallique (en $\Omega^{-1}.m^{-1}$), B_{eff} représente la valeur efficace du champ magnétique (en Tesla) au niveau de la zone de contact lingotière - produit coulé, et v représente le module de la vitesse de propagation du champ glissant (en m/s).

40 La vitesse v peut s'exprimer selon la relation :

$$v = 2\tau N$$

où τ représente le pas polaire de l'inducteur (en m) et N représente la fréquence du courant électrique d'excitation (en Hz) circulant dans l'inducteur.

La force électromagnétique F peut alors se mettre sous la forme analytique suivante :

$$F = 2\gamma\tau N B_{\text{eff}}^2$$

A priori il apparaît possible de modifier la force F, par exemple de l'augmenter, en agissant sur la fréquence N et/ou sur le champ magnétique B_{eff} .

Toutefois, le demandeur a déjà mis en évidence dans la demande de brevet français n° 76/03802 qu'en raison de la présence d'une lingotière en matériau conducteur de l'électricité, le champ magnétique traversant cette dernière n'est pas insensible à la fréquence du courant d'excitation. Il existe de ce fait, pour une lingotière donnée, une fréquence du courant optimale au delà de laquelle la force électromagnétique F décroît.

Une mise en oeuvre préférée de l'invention consiste donc à maintenir la fréquence du courant, c'est-à-dire la vitesse v, à une valeur constante et à régler le champ magnétique B_{eff} conformément à la relation suivante :

$$B_{\text{eff}} = \left\{ \frac{1}{\gamma v} (35d^2 + 260d) \right\}^{1/2}$$

Il sera avantageux de fixer la fréquence du courant à sa valeur optimale, comme l'enseigne la demande n° 75/05623, mais il va de soi que cela n'est pas indispensable à la mise en oeuvre de la présente invention.

On va maintenant décrire un exemple d'application à titre illustratif et sans intention de limiter la portée de l'invention. Une lingotière de coulée continue de billettes carrées d'acier de 120 mm de côté est équipée d'un inducteur électromagnétique constitué par un empilement de six bobines, (de préférence identiques entre elles mais pas nécessairement) et dont celle située à l'extrémité supérieure se trouve à un niveau correspondant au niveau moyen de la surface libre du métal coulé. Ces six bobines sont connectées entre elles par paire en série-opposition, et reliées à une alimentation triphasée de manière à générer, dans la cavité de la lingotière, une onde de flux magnétique qui remonte le long des parois de celles-ci. Dans le cas d'espèce décrit, l'élément de la lingotière définissant le passage pour le produit coulé est en cuivre au chrome-zirconium à durcissement structural et son épaisseur est de 8mm. Bien entendu il s'agit là d'une caractéristique nullement nécessaire à la mise en

oeuvre de l'invention mais dont le demandeur préconise tout de même l'option car elle permet l'emploi de parois de faible épaisseur, donc plus perméables au champ magnétique sans nuire pour autant à leur bonne tenue mécanique.

La vitesse d'extraction des billettes est voisine en permanence de 2 m par minute et, compte tenu des conditions de refroidissement, l'épaisseur de la

croûte solidifiée à la sortie de l'entrefer de l'inducteur est de 12 mm environ.

La longueur utile de l'inducteur est de 0,48 m, valeur correspondant à deux fois son pas polaire τ . L'inducteur a été dimensionné pour fournir par phase une intensité maximale de 350 A_{eff} sous une tension simple de 55V. L'opérateur de coulée désire par exemple repousser le pic d'inclusions à une profondeur d'en-

5 viron 8 mm sous la surface des billettes. Conformément à l'invention, l'inducteur devra alors créer dans le bain métallique, une force électromagnétique F de 4320 N/m³. La fréquence du courant d'excitation a été fixée à 10 Hz, ce qui, dans le cas d'espèce décrit correspond à la valeur optimale. Compte tenu de la conductibilité électrique de l'acier en fusion (voisine de $6,25 \times 10^5 \Omega^{-1} \cdot m^{-1}$)

10 l'opérateur devra donc régler la valeur efficace du champ magnétique à 0,038 Tesla, sous 380 G.

Lors des essais, un pic d'inclusion localisé à 8 mm de profondeur a été obtenu par un champ magnétique de 420 G. Les relations précitées donnent donc des valeurs approchées à 10 % ce qui est tout à fait convenable.

15 Le procédé selon l'invention peut être appliqué à tout produit métallique coulé en continu quels que soient sa composition ou son format.

Il permet de repousser à volonté les amas d'inclusions vers le centre des produits coulés jusqu'à des profondeurs prédéterminées et choisies par l'opérateur en fonction des traitements métallurgiques ultérieurs tels que le laminage,

20 de manière à obtenir à coup sûr une bonne qualité de surface de ces produits sans avoir recours à des traitements préalables tels que le flamage ou autres.

REVENDEICATIONS

1 - Procédé de brassage électromagnétique de métaux en fusion, au sein d'une lingotière de coulée continue, à l'aide d'un champ magnétique non stationnaire, glissant le long des parois de la lingotière, caractérisé en ce que la
 5 propagation du champ magnétique s'effectue selon un sens ascensionnel depuis la partie inférieure de la lingotière jusqu'au moins au niveau de la surface libre du métal coulé et en ce que l'on règle l'action du champ magnétique, en fonction de la localisation des amas d'inclusions non métalliques à une profondeur prédé-
 10 terminée d, à l'intérieur des produits coulés, de manière que la densité de force volumique F agissant dans le bain métallique satisfasse à la relation suivante :

$$F = 35d^2 + 260d$$

où F est exprimée en Newton par mètre et d en millimètres.

2 - Procédé selon la revendication 1 caractérisé en ce que l'on règle la
 15 valeur efficace B_{eff} du champ magnétique conformément à la relation suivante :

$$B_{eff} = \left(\frac{F}{\gamma v} \right)^{1/2}$$

où B_{eff} est exprimée en Tesla, γ représentant la conductibilité électrique du
 20 bain métallique est exprimée en $\text{Ohms}^{-1} \cdot \text{m}^{-1}$ et v, représentant la vitesse de propagation du champ magnétique, est exprimé en m.s^{-1} .

3 - Procédé de brassage électromagnétique de métaux en fusion au sein d'une lingotière de coulée continue, à l'aide d'un champ magnétique non stationnaire glissant le long des parois de la lingotière, caractérisé en ce que la propaga-
 25 tion du champ magnétique s'effectue selon un sens ascensionnel et en ce que l'on règle l'action du champ magnétique, en fonction de la profondeur désirée d de la localisation des amas d'inclusions non métalliques à l'intérieur des produits coulés de manière que la valeur efficace B_{eff} du champ magnétique exprimée en Tesla, satisfasse à la relation:

30
$$B_{eff} = \left\{ \frac{1}{\gamma v} (35d^2 + 260d) \right\}^{1/2}$$

où d est exprimée en mm, γ , exprimée en $\Omega^{-1} \cdot \text{m}^{-1}$, représente la conductibilité électrique du bain métallique et v, exprimée en m.s^{-1} , représente la vitesse de propagation du champ magnétique.

THIS PAGE BLANK (USP10)